

Verbundprojekt

**Silizium-Leistungselektronik der nächsten Generation für Mobilität,
Industrie und Stromnetze der CO₂-freien Ära
– Power2Power –**

Teilvorhaben

**Prozessgestaltung und Technologieentwicklung für die zukunftssichere
Leistungshalbleiterfertigung sowie -anwendung**

Schlussbericht gemäß NABF 2018

Projektlaufzeit: 1. Juni 2019 – 30. September 2022

Förderkennzeichen: 16ESE0397S

Im Rahmen der BMBF/ECSEL-Förderinitiative (Call ECSEL-2018- Innovation Action).

This project has received funding from the ECSEL Joint Undertaking (JU) under grant agreement No 826417. The JU receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation program and Germany, Austria, Spain, Finland, Hungary, Slovakia, Netherlands, Switzerland.

The content of this publication does not reflect the official opinion of the Joint Undertaking ECSEL. Responsibility for the information and views expressed in the publication lies entirely with the author(s).

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, und Forschung unter dem Förderkennzeichen 16ESE0397S gefördert. Diese Maßnahme wurde mitfinanziert mit Steuermitteln auf Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushalts. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/dem Autor.

Gefördert von:



Inhalt

<i>Kurzbericht</i>	5
Aufgabenstellung	5
Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	5
Ablauf des Vorhabens	6
Wesentliche Ergebnisse	6
Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
<i>Eingehende Darstellung</i>	8
Erzielte Ergebnisse der Technischen Universität Dresden	8
Professur Leistungselektronik	8
Professur für Technische Logistik	26
Notwendigkeit der geleisteten Arbeit	31
Voraussichtlicher Nutzen	31
Fortschritt bei anderen Stellen	32
Veröffentlichungen	32
Quellen	33

Abbildungen

ABBILDUNG 1: KÜHLKÖRPER UND ANORDNUNG DES LÜFTERS AUS [3]	12
ABBILDUNG 2: SPERRSCHICHTTEMPERATUREN UND KÜHLKÖRPERTEMPERATUR IN ABHÄNGIGKEIT DES LASTSTROMES IM KONTINUIERLICHEN BETRIEB	13
ABBILDUNG 3: ÜBER 20 MS GEMITTELTE MAXIMALTEMPERATUR ÜBER DEM NENNAUSGANGSSTROM DES UMRICHTERS FÜR IGBT, DIODE UND HEATSINK (HS) DES LASTPROFILS "HOHE ÜBERLAST MIT KURZZEITSTROM 150 %"	13
ABBILDUNG 4: THERMISCHE SIMULATION PRIMEPACK3+ ANSCHLUSS DC-, FUßPUNKTTEMPERATUR 150°C, TEMPERATUR ANSCHLUSS VERPLATTUNG 50 °C	14
ABBILDUNG 5: DEMONSTRATOR ZUR DURCHFÜHRUNG DER VERSUCHSREIHEN (LINKS VERSUCHSUMRICHTER ACS880 UND LASTDROSSEL, RECHTS: MESSTECHNIK UND SPANNUNGSVERSORGUNG)	15
ABBILDUNG 6: IGBT ANSTEUEREINHEITEN FÜR ECONOPACK+ MODUL (LINKS) UND XHP2 MODUL (RECHTS)	15
ABBILDUNG 7: VERGLEICH DER SCHALTVERLUSTE IN ABHÄNGIGKEIT DES LASTSTROMES FÜR VERSCHIEDENE SPERRSCHICHTTEMPERATUREN DES ECONOPACK+ UND XHP2 MODULS $V_{DC} = 900 \text{ V}$, $R_{G, on}, XHP2 = 0.5 \Omega$, $R_{G, off}, XHP2 = 0.73 \Omega$, $R_{G, on}, EP+ = 0.65 \Omega$, $R_{G, off}, EP+ = 0.65 \Omega$	16
ABBILDUNG 8: XHP2 MODULEN MIT ZUSÄTZLICHEN THERMOELEMENTEN ZUR DIREKTEN SPERRSCHICHTTEMPERATURMESSUNG.....	17
ABBILDUNG 9: MESSBAUGRUPPE ZUR AUSWERTUNG DER NICHT POTENZIALGETRENNTEN THERMOELEMENTE (AUFGRUND VON FEHLINTERPRETIERTEN PRODUKTIONS DATEN WURDE DIE FRÄSUNG GRÖßER ALS NÖTIG AUSGEFÜHRT)	17
ABBILDUNG 10: SCHALTVERLUSTE DES ECONOPACK+ UND XHP2 MODULS DER 1. GENERATION UND 2. GENERATION IM VERGLEICH ($V_{DC} = 900 \text{ V}$)	17
ABBILDUNG 11: VERGLEICH DER VORWÄRTS- UND RÜCKWÄRTSCHARAKTERISTIK INKLUSIVE SPANNUNGSABFALL ÜBER DEN SUBSTRATWIDERSTAND	18
ABBILDUNG 12: DIE THERMISCHEN ERSATZSCHALTBIlder FÜR DIE WÄRMEÜBERTRAGUNG VOM IGBT (I) BZW. DER DIODE (D) AN DIE UMGEBUNG (A)	19
ABBILDUNG 13: DIE RESULTIERENDEN MESSERGEBNISSE DER TRANSIENTEN THERMISCHEN IMPEDANZ FÜR DIE MODULE EP+ UND XHP2	19
ABBILDUNG 14: ERGEBNISSE DER SYSTEMSIMULATION DES ACS880 FÜR DIE KONTINUIERLICHE ANWENDUNG LÜFTER	20
ABBILDUNG 15: DER WIRKUNGSGRAD DER BEIDEN IGBT-MODULE DES ACS880 FÜR DIE ANWENDUNG LÜFTER	21
ABBILDUNG 16: ZYKLUS UND RESULTIERENDE TEMPERATUR DER IGBT- UND DIODENSPERRSCHICHT DES ACS880 MIT XHP2 MODULEN.....	21
ABBILDUNG 17: LEBENSDAUER ALS FUNKTION DES MAXIMALEN AUSGANGS-RMS-STROMES FÜR DEN ACS880 MIT XHP2 UND EP+ MODULEN	22
ABBILDUNG 18: DIE KOSTEN DES ANTRIEBES FÜR VERSCHIEDENE MAXIMALE RMS-STRÖME	23
ABBILDUNG 19: DIE TOPOLOGIE DES PRÜFSTANDES FÜR DEN DAUERBETRIEB DES EASY1B-DEMONSTRATORS	24
ABBILDUNG 20: DER ENTWORFENE WECHSELRICHTER MIT DEM EASY1B-MODUL IM TESTSTAND.....	24
ABBILDUNG 21: ZWEI INFRAROT AUFNAHMEN DER BAUTEILE UND DER LEITERPLATTEN BEI EINER SPERRSCHICHTTEMPERATUR VON 175 °C MIT NATÜRLICHER KONVEKTION (LINKS) UND ERZWUNGENER KONVEKTION (RECHTS).....	25
ABBILDUNG 22: PER SKRIPT GENERIERTE, ABSICHTLICH FEHLERHAFT E LABELS	27
ABBILDUNG 23: CAD-SKIZZEN/BAUGRUPPEN, 3D-DRUCK SOWIE DAS DATENMODELL DER DEMONSTRATOR-MESS-BOX	29
ABBILDUNG 24: VORORTBEGEGHUNGEN BEI PARTNERN; AUFBEREITUNG DER ANALYSEN	30

Power2Power Schlussbericht

Partner in Deutschland:

Name (rechtsverbindlich)	Kurzform	PLZ	Ort	Art
Koordinator: Infineon Technologies Dresden GmbH & Co. KG	IFD	01099	Dresden	Industrie
AVL Software & Functions GmbH	AVL SFR	93059	Regensburg	Industrie
Elektrische Automatisierungs- und Antriebstechnik EAAT GmbH	EAAT	09244	Lichtenau	KMU
Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V.	FHG	80686	München	F&E
Hesse GmbH	HESSE	33100	Paderborn	KMU
Hochschule Zittau/Görlitz	HSZG	02763	Zittau	F&E
Infineon Technologies AG	IFAG	85579	Neubiberg	Industrie
mi2-factory GmbH	mi2	07745	Jena	KMU
SGS Institut Fresenius GmbH	SGS	65232	Taunusstein	Industrie
Siltronic AG	SIL	81737	München	Industrie
Technische Universität Chemnitz	TUC	09111	Chemnitz	F&E
Technische Universität Dresden	TUDD	01069	Dresden	F&E
Technische Universität Ilmenau	TUIL	98693	Ilmenau	F&E
Universität Bremen	UniHB	28359	Bremen	F&E
Universität Paderborn	UPB	33098	Paderborn	F&E
Universität Rostock	UROS	18051	Rostock	F&E
X-FAB Dresden GmbH & Co. KG	XFAB-DD	01109	Dresden	Industrie
X-FAB Semiconductor Foundries AG	XFAB-EF	99097	Erfurt	Industrie

Kurzbericht

Aufgabenstellung

Im Rahmen des ENIAC-Vorhabens Power2Power beteiligte sich die TU Dresden mit der Professur für Technische Logistik sowie mit der Professur für Leistungselektronik. Ihre Arbeiten basieren auf folgenden Aufgabenstellungen:

- Die Überführung etablierter (insb. automatisierter) Prozesse aus dem Front-End-Bereich in das Back-End aus logistischer Sicht zur Erhöhung der Effizienz im Back-End, d. h. z. B. einer Steigerung des Durchsatzes, Verringerung der Durchlaufzeit und eine Verbesserung der Robustheit der Transport- und Handhabungsprozesse.
- Steigerung des Automatisierungsgrades beim Verpacken und Entpacken von Wafer-Transport-Carriern durch Bewertung entsprechende Konzepte aus logistisch-konstruktiver Sicht. Ziel ist die automatische Kalibrierung von Handlingsrobotern.
- Verbesserung der gesamten Wertschöpfungskette, insb. zur Vermeidung von Bullwhip-Effekten, durch Auswahl geeigneter Semantic-Web-Technologien zur konsistenten Modellierung von Supply Chains und die Wahl und Bewertung von Prognoseverfahren und Methoden zur Stabilisierung der Lieferketten.
- Erarbeitung von möglichen Anwendungsbeispielen für IGBT-Module mit einem erhöhten Sperrschichttemperaturbereich und deren Anforderungen und Arbeitspunkte
- Design, Simulation und Aufbau einer Kommutierungszelle für IGBT-Module mit einer erhöhten IGBT-Sperrschichttemperatur bis zu $T_j=200\text{ °C}$
- Analyse, Modellbildung und Entwicklung eines Wechselrichters für den erhöhten Temperaturbereich einschließlich eines Life-Cycle-Kostenmodells

Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Aufgrund des weltweit steigenden Energiebedarfs, ist eine zunehmende Nutzung erneuerbarer Energien erforderlich, um Kohlendioxidemissionen zu verringern. Für die Energieumwandlung werden effiziente Leistungshalbleiter benötigt, weshalb die Märkte für IGBTs und Module jährlich um rund 15 % wachsen. Um an dieser Entwicklung zu partizipieren, war und ist eine technologische Führerschaft bei der Entwicklung als auch Fertigungskompetenz im globalen Wettbewerb notwendig. Hierzu mussten F&E-Tätigkeiten initiiert und schwerpunktmäßig basierend und über den Stand der Technik hinaus auf 300mm-Siliziumwafern Spannungen >1700 Volt bewältigt, höhere Leistungsdichten erreicht sowie Zuverlässigkeit und Energieeffizienz verbessert werden.

Mit der Einführung neuer Technologie bei gleichzeitig sich verstärkendem (internationalen) Wettbewerbsdruck galt es, die Effizienz der Produktion und Logistik zu hinterfragen und Konzepte zur Steigerung zu entwickeln. Ausgangspunkt dieses Anspruchs war die Feststellung, dass der Automatisierungsgrad des Transport- und Handhabungssystems vor Projektbeginn zu niedrig und absehbar nicht ausreichend wettbewerbsfähig war.

Ablauf des Vorhabens

Das Projekt baute auf der gebündelten wissenschaftlichen und technologischen Expertise der deutschen Partner auf, die sich aus den Bereichen: Industrie, kleine und mittelständische Unternehmen und Wissenschaft zusammensetzten. Das europäische Fördervorhaben war als „Innovation Action“ geplant worden und so orientierten sich auch die deutschen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an diesem Format. Der Fokus von Power2Power lag auf dem Gebiet der Leistungselektronik. Das Vorhaben bezog sich auf die Anforderungen des ECSEL Multi Annual Strategic Plan (MASP) 2018. Es standen besonders die Kapitel 8 (Energy) und 6 (Transport & Smart Mobility) im Vordergrund, mit Hauptaugenmerk der übergeordneten Themen „More than Moore and Heterogeneous System-on-Chip (SoC) Integration“, „Advanced smart System-in-Package (SiP) application“ sowie „Maintaining world leadership in Semiconductor Equipment, Materials and Manufacturing solution“ und auf den Anwendungsthemen „Ensuring sustainable power generation and energy conversion“, „Reducing energy consumption“ und „Developing clean, affordable and sustainable propulsion“.

Hier adressierten die F&E-Tätigkeiten der TU Dresden und die der deutschen Partner die ganze integrierte Wertschöpfungskette der Forschung, Entwicklung und Fertigung – von der Idee bis zum Produkt – vom Lieferanten bis zum Endkunden.

Die kollaborative und ergebnisorientierte Arbeit wurde durch regelmäßigen Austausch in Form bilateraler und konsortialer Absprachen und Workshops sichergestellt. Die Arbeiten der beteiligten Forschungsstellen der TU Dresden, wie auch des deutschen Teilkonsortiums insgesamt fügten sich nahtlos in das Gesamtvorhaben ein.

Wesentliche Ergebnisse

Gemessen am Stand der Forschung und Entwicklung sowie vor dem Hintergrund der formulierten Aufgabenstellungen/Zielen, konnten seitens TU Dresden folgende, wesentliche Ergebnisse erzielt werden:

- Maßnahmenkatalog zur Steigerung der Effizienz von Produktion und Logistik: Mittels umfangreicher Datenanalyse, Vor-Ort-Begehungen bei Konsortialpartnern und Workshops konnten Schwachstellen identifiziert, Notwendigkeiten priorisiert, Konzepte entworfen, Potentiale bewertet und teils im Ansatz getestet werden.
- Demonstrator zur Erfassung von Trajektorien von Handhabungstechnik: Es entstand ein 3D-gedrucktes Gehäuse, ausgestattet mit ausgesuchten Sensoren und programmierten Mikrocontrollern sowie Auswerteroutinen, als Vorstufe zur automatischen Rekalibrierung von Robotern.
- Weiterentwicklung von Semantic-Web-Ansätzen zur Beherrschung komplexer Supply-Chains: Es wurde ein umfangreicher Literatur-Review aktueller Veröffentlichungen durchgeführt, d. h. recherchiert, Literatur in einer Datenbank gespeichert, Inhalte gelesen und hinsichtlich Relevanz/Potential zur Verwertung bewertet.

Power2Power Schlussbericht

- Identifizierung kritischer Wechselrichterkomponenten hinsichtlich einer erhöhten IGBT-Sperrschichttemperatur
- Entwicklung eines Demonstrators zur Charakterisierung von IGBT-Modulen mit einer erhöhten Sperrschichttemperatur
- Charakterisierung eines Econopack+ und eines neuartigen XHP2-Modules hinsichtlich der Schalt-, Durchlasseigenschaften, sowie des thermischen Verhaltens und Vergleich dieser Module in einem weiten Temperatur-, Spannungs- und Strombereichs. Dabei zeigt das XHP2-Modul verbesserte elektrische Eigenschaften und einen leicht erhöhten thermischen Widerstand
- Simulative Untersuchungen zeigen einen potenziellen Nutzen der neuartigen Module im Bereich von stark zyklischen Anwendungen aufgrund der verbesserten Zyklusfestigkeit. Aufgrund der höheren Betriebstemperatur ist der Wirkungsgrad des neuartigen Moduls und des Referenzmoduls vergleichbar
- Zusätzlich wurden auch IGBT-Module kleinerer Leistung für Leiterplattenmontage (easy1B-Modul) hinsichtlich einer erhöhten Sperrschichttemperatur simulativ und experimentell untersucht. Hierbei zeigt sich, dass eine erhöhte Sperrschichttemperatur die umgebenden Systemkomponenten (Leiterplatte, Treiber, ...) nicht unzulässig erhöht.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zusammen spiegeln die Partner im deutschen Teilkonsortium von Power2Power die essentiellen Treiber für Innovationen in den Bereichen

- effizienter Leistungshalbleiter,
- leistungsfähiger Fertigungsanlagen und Transport-/Handhabungssysteme sowie
- sicherer und nachhaltiger Produktionsprozesse

wider und profitierten merklich von der profunden Expertise sowohl im deutschen Teilkonsortium, als auch von der intensiven Zusammenarbeit mit allen europäischen Partnern, des ECSEL JU Projekts Power2Power.

Es gab keine weiteren Kooperationen mit Partnern außerhalb des europäischen Verbundprojekts.

Eingehende Darstellung

Erzielte Ergebnisse der Technischen Universität Dresden

Professur Leistungselektronik

Subtask 5.2.1a bis c

Definition der Anforderungen

Zusammen mit dem Projektpartner ABB (ABB OY, Finnland) wurden diverse Anwendungsmöglichkeiten und Anforderungen diskutiert. Das Anwendungsbeispiel einer Zuckerrohrzentrifuge steht dabei im besonderen Fokus. Diese dient zum Abtrennen des kristallinen Feststoffes Melasse aus dem Dicksaft. Da es sich beim Zentrifugieren um einen dynamischen Vorgang handelt und beim Abbremsen der Zentrifuge eine Energierückgewinnung stattfinden kann, werden zunehmend Umrichter in dieser Anwendung eingesetzt. Der vollständige Zyklus kann in die Phasen Befüllen, Beschleunigen, Zentrifugieren, Bremsen und Leeren unterteilt werden und benötigt 153 s. Je nach Anbaugelände ist ein zuverlässiger Betrieb des Umrichters 24 h am Tag für 2-5 Monate notwendig (Erntezeit). Erforderlich ist eine Lebensdauer des Umrichters von 10 Jahren. Durch den dynamischen Prozess kommt es zu einer starken Beanspruchung des Moduls (Thermal Cycling, Power Cycling, raue Umgebungsbedingungen). Der Einsatz einer neuen IGBT-Technologie mit einer höheren maximalen Sperrschichttemperatur könnte hier

- zu einem höheren mittleren Ausgangsstrom (höhere Leistungsdichte des Umrichters),
- zu einer höheren Überlastfähigkeit oder
- zu einer verbesserten Lebensdauer aufgrund einer höheren Temperaturreserve

führen.

Es lassen sich weitere Einsatzgebiete für kontinuierliche und zyklische Anwendungen finden (Tabelle 1).

Tabelle 1: Beispielanwendungen

	kontinuierlich	zyklisch	Sonstiges
Anwendungs- gebiet	Pumpe, Lüfter	Zuckerrohr Zentrifuge, Pumpe, Winde, Fahrstuhl	Netzumrichter

Da es sich bei der Zuckerrohrzentrifuge um eine Anwendung mit Strömen im Bereich von 600 A handelt und die Spannungsklasse auf 1700 V festgelegt wurde, kommen IGBT Module in der Bauform Primepack2, Primepack3, Econopack und IHM in Frage. Die .XT-Technologie von Infineon ermöglicht eine Sperrschichttemperatur im Schaltbetrieb von 175 °C. Diese Technologie kommt zum aktuellen Zeitpunkt in den erhältlichen Modulen Primepack2 und

Power2Power Schlussbericht

Primepack3 zur Anwendung. Eine weitere Bauform mit .XT-Technologie, welche sich derzeit in der Entwicklungsphase befindet, ist das XHP2-Modul.

In der Anfangsphase des Projektes werden nach Rücksprache mit dem Projektpartner IFAG keine Halbleitermodule mit einer maximalen Sperrschichttemperatur von 200 °C zur Verfügung stehen. Um dennoch die Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit eines Umrichters und der mit der Temperaturerhöhung verbundenen notwendigen Designmaßnahmen untersuchen zu können, bietet sich der Einsatz von Modulen mit .XT-Technologie an. Nach Rücksprache mit IFAG, ermöglichen diese Module auch für einige Zeit höherer Sperrschichttemperaturen.

Folgende Umrichterparameter, welche auch zu realisierende Demonstrator aufweisen sollte, wurden für die Zuckerrohrzentrifuge getroffen, können aber auch exemplarisch für die anderen Anwendungsfälle gelten.

Parameter	Wert	Bemerkung
Zwischenkreisspannung U_{DC} / V	1100 / 900	Aktives Frontend für rückspeisefähige Anwendungen (zyklischer Betrieb) / Passives Frontend für nicht rückspeisefähige Anwendungen (kontinuierlicher Betrieb)
Schaltfrequenz f_{sw} / kHz	2 - 5	
Modulation	Raumzeigermodulation	
Umgebungsbedingungen	Zuckerrohrzentrifuge – Außeneinsatz; Winde – maritimer Einsatz; Pumpe, Netzstromrichter, Fahrstuhlantrieb – Inneneinsatz	Die jeweiligen Umgebungsbedingungen werden auch im Rahmen von WP6 vom Projektpartner ABB beschrieben.
Lastprofile	Beispiellastprofile vorhanden für: Zuckerrohrzentrifuge, Pumpe, Winde, Fahrstuhl Netzstromrichter: Netzspannungseinbruch (Fault Ride Through - FRT)	Von unserem Projektpartner ABB bereitgestellt Das Durchfahren von Netzspannungseinbrüchen aktueller Netze ist in [1] und [2] geregelt.
Lebensdauer	(> 8) 10 Jahre	Abhängig von der Anwendung

Kurzschlussanforderungen	> 5 bis 7 μ s	Kurzschlusswiderstandsfähigkeit des IGBTs
IGBT Bauform	XHP2, (Primepack2)	Für den Demonstrator wird das XHP2 Package bevorzugt.
IGBT Spannungs-klasse	1700 V	

Untersuchung kritischer Elemente eines Umrichters hinsichtlich der maximalen Einsatztemperatur

Um thermische Konzepte für die Kommutierungszelle zu erarbeiten, spielen auch die eingesetzten Betriebsmittel und Materialien eines Umrichters eine Rolle. Kritische Elemente sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Kritische Elemente eines Umrichters hinsichtlich der maximalen Temperatur

Element	$T_{\max} / ^\circ\text{C}$	Bemerkung
Mechanik		
Kunststoff Abstandsbolzen	110	Alternative: <ul style="list-style-type: none">• Sonderanfertigung aus Spezialkunststoffen• Einsatz von Metallabstandsbolzen (keine Isolierung möglich)
Stützisolatoren	120	
Verplattung		
Isolation Hostaphan RN	130	Weitere Materialien wie z.B. Teflon mit $T_{\max} = 260\text{ }^\circ\text{C}$ möglich
Isolation UPM203	155	
Schraubverbindung der Kupferverplattung versilbert / vernickelt	115	Nach IEC 62271-1:2007/A1:2011
Zwischenkreiskondensatoren		
Elektrolyt	80 – 100	Lebensdauer sinkt mit erhöhter Temperatur. Mögliche Maßnahme: Wahl eines Kondensators mit höherer Spannungs-klasse zur Kompensation des Lebensdauerverlusts
Folie	100	
IGBT-Ansteuerbaugruppe „Gate Drive Unit (GDU)“ – Leiterplattenmaterial, aktive und passive Bauelemente		

Leiterplattenmaterial

FR4	110	= Standardmaterial für Leiterplatten $T_{\max} = T_g - 25 \text{ °C}$ (T_g ... Glaspunkttemperatur) Alternativen: <ul style="list-style-type: none"> • "FR4 high Tg": $T_{\max} = 145 \text{ °C}$ • Weitere: $T_{\max} = 175 \dots 255 \text{ °C}$
-----	-----	---

Passive Bauelemente

SMD Widerstände	230 - 245	Erhöhte Temperaturanforderungen führen zu einem erhöhten Preis
Kondensatoren Tantal	200	Hoher Preis
Kondensatoren Elektrolyt		Lebensdauer sinkt mit der Temperatur
Kondensatoren Keramik	200	Preis steigt mit der Kapazität
Induktivitäten	150	

Integrierte Schaltkreise / Gleichspannungswandler (DCDC)

Digitalisolatoren	125	
Treiber	105 - 120	Typische Treiber wie EiceDriver, ACPL, UUC21520
Operationsverstärker	125	
DCDC Wandler	85/90/(105)	Leistungsreduzierung in Abhängigkeit der Temperatur möglich
LWL Sender / Empfänger	85	Beispiel Avago AFBR

Kühlung

Wärmeleitpasten	165-200	Erhöhte Temperatur kann sich negativ auf die Lebensdauer auswirken (Trennung der Bestandteile) Mögliche Alternative: Wärmeleitfolien
-----------------	---------	---

Weiterhin kommt bei einigen Elementen zur Umgebungstemperatur noch die Eigenerwärmung hinzu, sodass die realisierbare Einsatztemperatur unter der maximalen Temperatur liegt.

Vorbetrachtungen

Power2Power Schlussbericht

Erste Simulationen wurden zu Beginn mit Primepack Modulen durchgeführt, da anfangs nur für diese Module Daten vorlagen. Dabei wurden folgende Größen gewählt und Annahmen getroffen:

- Modul: Infineon FF1200R17IP5 mit einem Kollektor-Dauergleichstrom $I_{C,nom} = 1200 \text{ A}$ und einer maximalen Kollektor-Emitter-Sperrspannung $U_{CES} = 1700 \text{ V}$
- Modellierung des elektrischen und thermischen Verhaltens nach Datenblattangaben
- Topologie: 2L
- Modulation: Raumzeigermodul
- Schaltfrequenz $f_{sw} = 2100 \text{ Hz}$
- Kühlung (siehe Abbildung 1)
- Luftkühlung
- Kühlkörper: Webra W-240-64-15-23
- Umgebungstemperatur: $T_{amb} = 45 \text{ °C}$
- Lüfter: RE22P-2DK.3F.1R
- Zwischenkreisspannung $U_{DC} = 900 \text{ V}$
- Leistungsfaktor $\cos(\varphi) = 0,8$
- Vernachlässigung des Wärmeübergangsmaterials zwischen Bodenplatte und Kühlkörper
- Reihenschaltung der thermischen Modelle (Cauer) von IGBT Modul und Kühlkörper (Modellierung des Kühlkörpers als RC-Glied)
- Annahme: Thermischer Widerstand des Kühlkörpers verhält sich linear zur Fläche der Bodenplatte des IGBTs

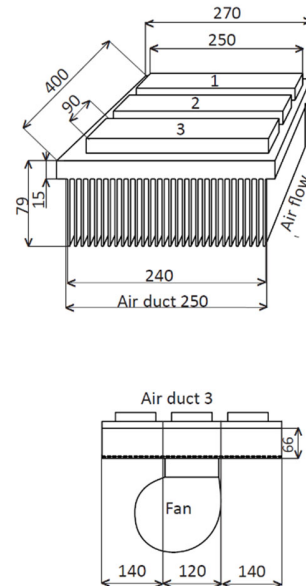


Abbildung 1:
Kühlkörper und
Anordnung des Lüfters
aus [3]

Mithilfe von PLECS wurden kontinuierliche und zyklische Anwendungen simuliert.

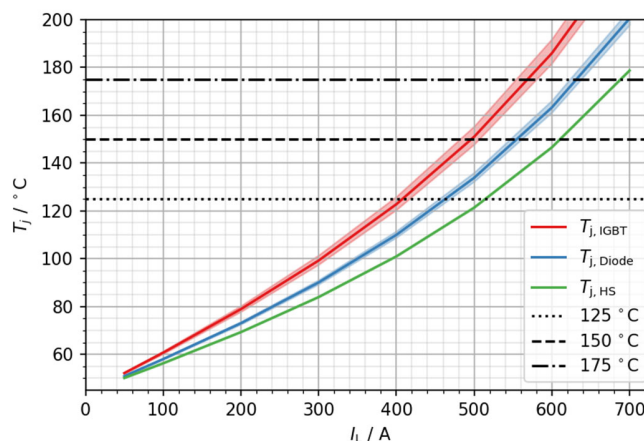


Abbildung 2: Sperrschichttemperaturen und Kühlkörpertemperatur in Abhängigkeit des Laststromes im kontinuierlichen Betrieb

Abbildung 2 stellt die Sperrschichttemperatur von IGBT und Diode sowie die Kühlkörpertemperatur über dem Laststrom dar. Wird die Sperrschichttemperatur um 25 K von 125 °C auf 150 °C erhöht, ist eine Stromerhöhung von 21,7 % möglich. Bei einer Erhöhung von 150 °C auf 175 °C steigt der Strom um 14,7 %. Damit ist bei gleichbleibender Kühlung eine Leistungssteigerung des Umrichters möglich.

Mithilfe der von Siemens veröffentlichten Standard Lastprofilen [1], erfolgte die Simulation des zyklischen Betriebs. Abbildung 3 zeigt die gemittelte Maximaltemperatur über dem Nennausgangsstrom für das Lastprofil „Hohe Überlast“ mit folgenden Daten:

- Lastspieldauer: 300 s
- Grundlast $I_L = 0,75 I_N$ für 240 s
- Überlast $I_{OL} = 1,5 I_N$ für 60 s

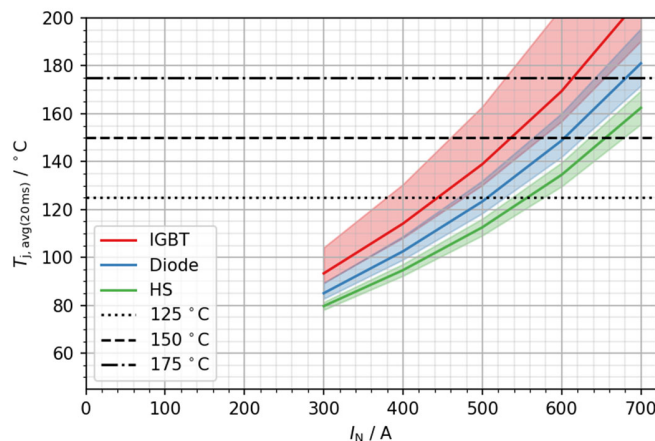


Abbildung 3: Über 20 ms gemittelte Maximaltemperatur über dem Nennausgangsstrom des Umrichters für IGBT, Diode und Heatsink (HS) des Lastprofils "Hohe Überlast mit Kurzzeitstrom 150 %"

Eine Steigerung der über 20 ms gemittelten Maximaltemperatur

- von 125 °C auf 150 °C führt zu einer Erhöhung von I_N um 22 % bzw.
- von 150 °C auf 175 °C zu einer Erhöhung um 15 %.

Zu beachten ist die verringerte Lebensdauer des IGBT-Moduls durch eine erhöhte Temperaturbelastung. Weiterhin führt eine Temperaturerhöhung auch zu einem erhöhten Wärmeeintrag in Verplattung und Ansteuerschaltung. Dazu wurden erste thermische Simulationen durchgeführt um den Wärmeeintrag abzuschätzen.

Aufgrund der Ähnlichkeit von Primepack2 und Primepack3+ und dessen Verfügbarkeit, wurde eine thermische Simulation mit Primepack3+ durchgeführt. Dabei wurde eine Fußpunkttemperatur von 50 °C und eine Anschlusstemperatur der Verplattung von 150 °C angenommen (Abbildung 4).

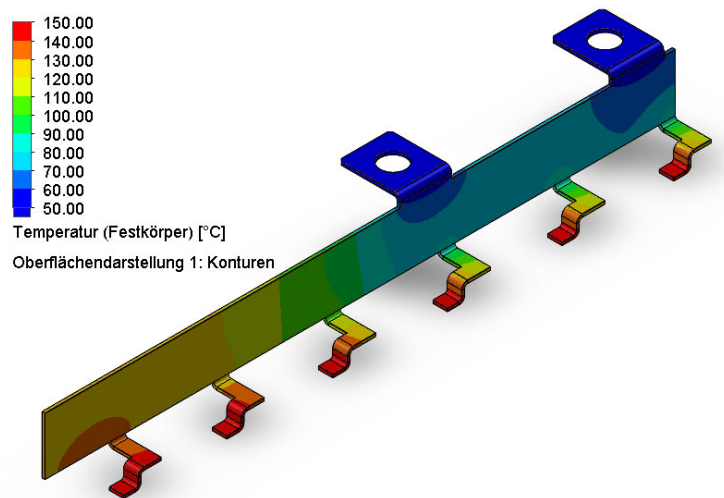


Abbildung 4: Thermische Simulation Primepack3+ Anschluss DC-, Fußpunkttemperatur 150°C, Temperatur Anschluss Verplattung 50 °C

Dies führt zu einem Wärmefluss von $\dot{Q}_{DC-} = 27 \text{ W}$ und damit zu einem thermischen Widerstand von $R_{th} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}_{DC-}} = 3,7 \frac{\text{K}}{\text{W}}$.

Design des Demonstrators

Am 11.11.2019 wurde eine Entscheidung zur Verfügbarkeit von Modulen getroffen. Im weiteren Verlauf des Projektes werden XHP2 Module untersucht. Die kommerzielle Verfügbarkeit ist derzeit nicht gegeben, jedoch stellt Infineon die benötigte Anzahl an Modulen bereit.

Um einen Demonstrator vergleichbar zu einem industriellen Design zu erarbeiten, wurde ein Umrichter aus der ACS880 Produktfamilie von ABB als Basis ausgewählt, welcher von ABB zur Verfügung gestellt wurde. Dieser Umrichter wird für das neue XHP2 IGBT Modul mit erhöhter maximaler Sperrschichttemperatur angepasst. Dies erfordert Änderungen der Zwischenkreisverplattung für das neue Modul und Erarbeitung eines Ansteuerkonzeptes sowie die Auslegung von weiteren Komponenten und Materialien.

Ein zweiter ACS880 Umrichter wird von ABB zum Vergleich zur Verfügung gestellt, sodass einerseits ein Vergleich der thermischen Beanspruchung zwischen Demonstrator und industriellen Produkt erfolgen kann. Weiterhin ist der Vergleich zwischen dem neuen XHP2 Modul und dem weitverbreitetem EconoPACK+ Modul möglich.

Die thermische Auslegung einiger Komponenten des Demonstrators erfolgt simulativ. Es hat sich gezeigt, dass Standardisolationismaterialien für die Zwischenkreisverplattung geeignet sein sollten. Aus Sicherheitsgründen wird Polytetrafluoroethylen eingesetzt, welches Temperaturen bis zu 260 °C stand hält. Weitere Temperaturmessungen am Umrichter sollen die Simulation validieren. Als Leiterplattenmaterial wird der Standard flammhemmende Verbundwerkstoff FR4 eingesetzt. Durch eine erzwungene Kühlung kann die Temperatur auf 110 °C begrenzt werden.

Power2Power Schlussbericht

Eine detaillierte Beschreibung der Arbeiten zum Demonstrator kann dem Dokument „D5.10 Commutation cell demonstrator in extended operation range“ [2] vom 30.11.2020 entnommen werden.

Im Jahr 2020 wurde der Demonstrator erarbeitet, um das Verhalten neuartiger leistungselektronischer Bauelemente mit erhöhter Sperrschichttemperatur und dessen Einfluss auf umgebende Elemente zu untersuchen. Dieser Teststand wurde Anfang 2021 fertig gestellt und in Betrieb genommen (Abbildung 5).



Abbildung 5: Demonstrator zur Durchführung der Versuchsreihen (links Versuchsumrichter ACS880 und Lastdrossel, rechts: Messtechnik und Spannungsversorgung)

Dazu erfolgte die Entwicklung der notwendigen Ansteuerschaltungen (Gate Drive Units) für die beiden IGBT-Module in den Bauformen XHP2 und Econopack+ (siehe Abbildung 6).

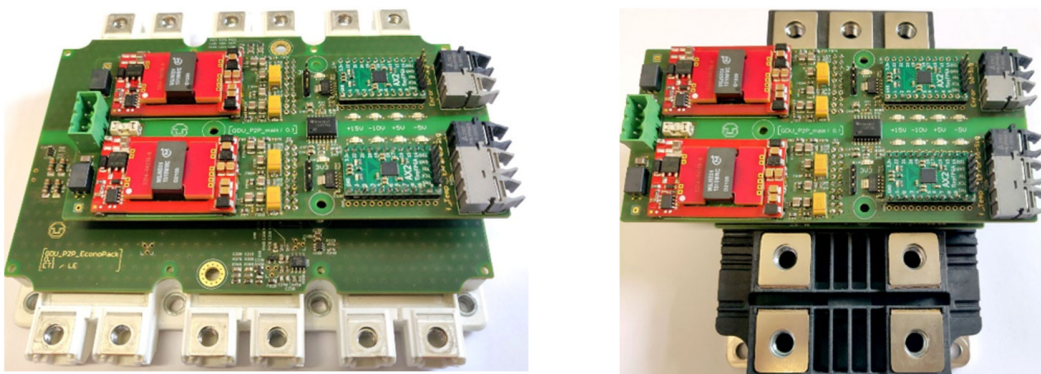


Abbildung 6: IGBT Ansteuereinheiten für Econopack+ Modul (links) und XHP2 Modul (rechts)

Messungen am Demonstrator

Bei Vorversuchen mit dem XHP2 Modul kam es zu einem Ausfall eines XHP2 Modul bei einer Bodenplattentemperatur von ca. 200 °C. Da die Module aus einer Vorserienproduktion entstammen, ist die Aufbau- und Verbindungstechnik noch nicht optimiert, wodurch sich Bondverbindungen bei hohen Temperaturen lösen. Nach Rücksprache mit IFAG wurde beschlossen, die Temperatur beim passiven externen Erwärmen auf 170 °C zu beschränken. Daher konnten nachfolgende Messungen nicht bei 200 °C durchgeführt werden. Die Messdaten der Flussspannung sowie der Schaltverluste können jedoch bis auf 200 °C extrapoliert werden. Abbildung 7 zeigt die Schaltverluste der beiden Module im Vergleich.

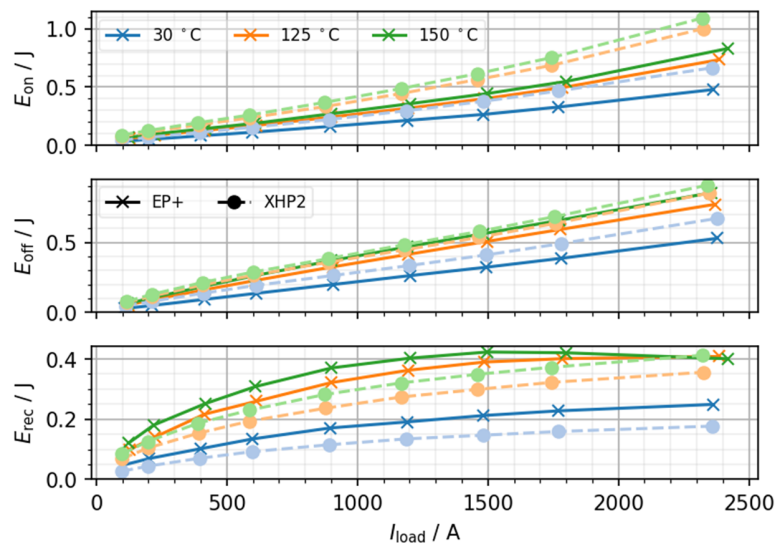


Abbildung 7: Vergleich der Schaltverluste in Abhängigkeit des Laststromes für verschiedene Sperrschichttemperaturen des Econopack+ und XHP2 Moduls $V_{DC} = 900 \text{ V}$, $R_{G,on,XHP2} = 0.5 \Omega$, $R_{G,off,XHP2} = 0.73 \Omega$, $R_{G,on,EP+} = 0.65 \Omega$, $R_{G,off,EP+} = 0.65 \Omega$

Dabei zeigen sich leicht erhöhte Schaltverluste des XHP2 Moduls im Vergleich zum Econopack+ Modul. Eine Ansteuerung mit verkleinerten Gatewiderstand des XHP2 Moduls führt zu verringerten Verlusten, jedoch können die Verluste nicht unter die Verluste des Econopack+ Moduls gesenkt werden. Ursache ist der erhöhte interne Gatewiderstand.

Für weitere Untersuchungen wurden von IFAG weitere XHP2 Module mit integriertem Thermoelement zur Verfügung gestellt (siehe Abbildung 8). Zur Auswertung dieser wurde die in Abbildung 9 dargestellte Messbaugruppe entwickelt, um auch Thermoelemente auf Potenzial auszuwerten.

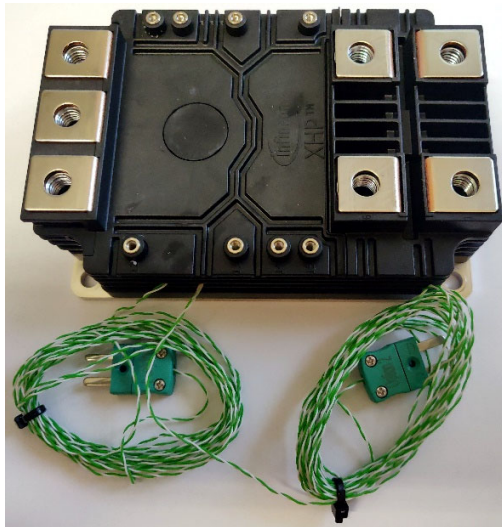


Abbildung 8: XHP2 Modul mit zusätzlichen Thermoelementen zur direkten Sperrschichttemperaturmessung

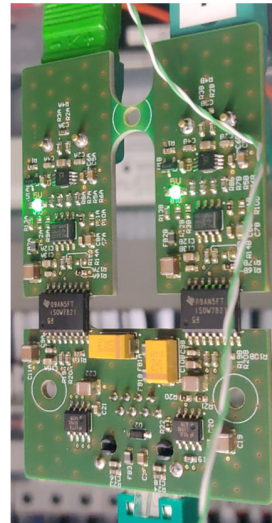


Abbildung 9: Messbaugruppe zur Auswertung der nicht potenzialgetrennten Thermoelemente (Aufgrund von fehlinterpretierten Produktionsdaten wurde die Fräsung größer als nötig ausgeführt)

Erste Messungen der neuen XHP2 Module zeigten ein anderes Verhalten als bisherig bereitgestellte Module. Erneut durchgeführte Messungen zur Charakterisierung der Schalt- und Durchlassspannung zeigen deutlich bessere Eigenschaften (siehe Abbildung 10 und Abbildung 11).

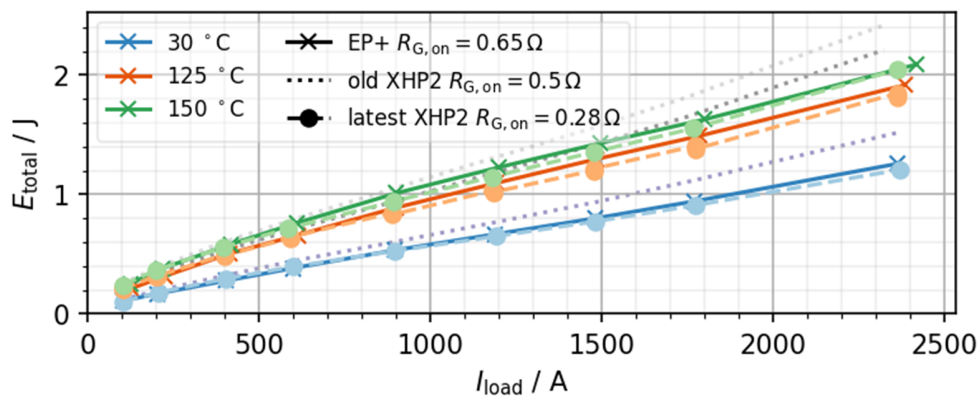


Abbildung 10: Schaltverluste des Econopack+ und XHP2 Moduls der 1. Generation und 2. Generation im Vergleich ($V_{DC} = 900 V$)

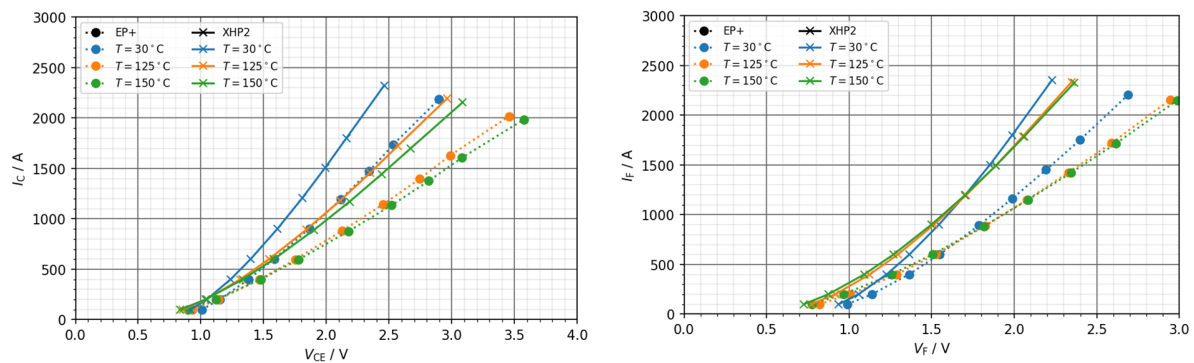


Abbildung 11: Vergleich der Vorwärts- und Rückwärtscharakteristik inklusive Spannungsabfall über den Substratwiderstand

Im entsprechenden Nennarbeitspunkt (1500 A, 900 V) weist das XHP2 Modul der 2. Generation um 5-10 % geringe Schaltverluste und eine um ca. 0,4 V verringerte Durchlassspannung auf. Es ist daher eine höhere Effizienz des Umrichters zu erwarten.

Während der Messungen kam es bei einer Sperrschichttemperatur von 170 °C und einem Strom von 1500 A zu einem weiteren Ausfall des Moduls. Dieser führte zu einer Zerstörung des Moduls sowie der Ansteuereinheit. Nach Rücksprache mit IFAG lässt sich die Ursache auf eine fehlerhafte Bondverbindung aufgrund des Vorseriencharakters des Moduls zurückführen. Aufgrund der geringen Verfügbarkeit dieser Module und des nicht unwahrscheinlichen Defekts eines weiteren Bauteils, werden keine weiteren Schaltversuche sowie Kurzschlussversuche durchgeführt. Die bisher gewonnenen Messdaten sind ausreichend, um die angestrebten Anwendungen simulativ zu bewerten.

Die thermischen Eigenschaften des XHP2-Gehäuses werden mit dem entwickelten Z_{th} -Teststand gemessen. Der ACS880 ist mit den XHP2-Modulen und den 350 µm dicken Graphitpads als thermisches Übergangsmaterial ausgestattet. Die Messungen werden analog zu den EP+ Modulen durchgeführt. Abbildung 12 zeigt die verwendeten thermischen Ersatzschaltbilder. Die Parameter der oberen Ersatzschaltbilder werden direkt bei der Messung geschätzt. Das untere Schaltbild wird daraus berechnet und bildet die Grundlage für die Umsetzung in der Systemsimulation. Die resultierenden Kurvenverläufe für das EP+ und XHP2 Gehäuse sind in Abbildung 13 dargestellt.

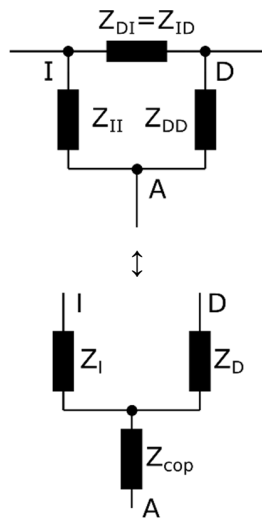


Abbildung 12: Die thermischen Ersatzschaltbilder für die Wärmeübertragung vom IGBT (I) bzw. der Diode (D) an die Umgebung (A)

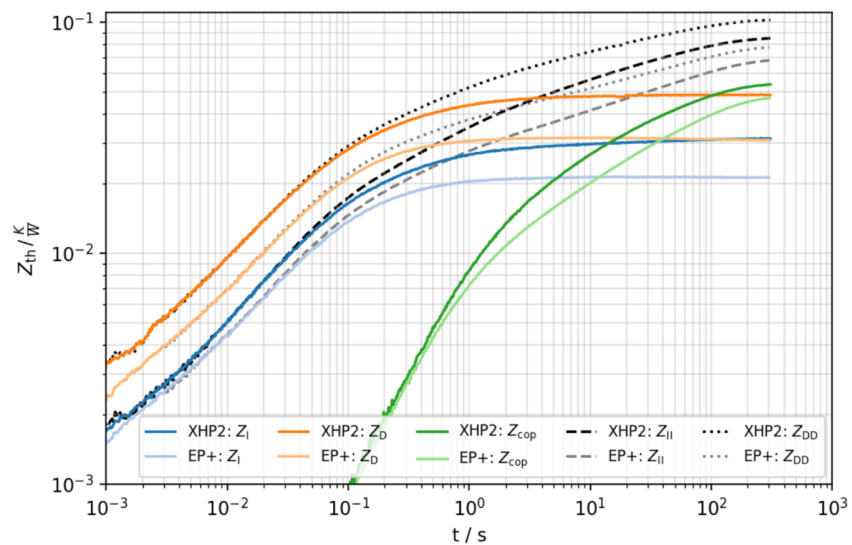


Abbildung 13: Die resultierenden Messergebnisse der transienten thermischen Impedanz für die Module EP+ und XHP2

Die thermische Impedanz von der Sperrschicht zum Gehäuse Z_{II} bzw. Z_{DD} des XHP2-Moduls ist im Vergleich zum Econopack+-Modul erhöht, was auf die kleinere Bodenplatte und die kleinere Chipgröße des XHP2-Moduls zurückzuführen ist. Dies führt zu einer höheren Betriebstemperatur. Die Kopplung zwischen IGBT und Diode des XHP2-Moduls ist aufgrund der geringeren Anzahl von Chips und der daraus resultierenden kleineren Kopplungsfläche innerhalb des Moduls geringer.

Systemsimulation

Mit diesen Daten wird die Systemsimulation des Lüfters und der Zuckermühlentrifuge durchgeführt. Tabelle 3 listet die Simulationsparameter für die kontinuierliche und zyklische Anwendung auf.

Tabelle 3: Die Parameter der Systemsimulation des ACS880

Parameter	Lüfter	Zuckerzentrifuge
f_{sw}	2250 Hz	2250 Hz
f_{out}	50 Hz	2-72 Hz
V_{DC}	976 V	976 V
V_{RMS}	690 V	18 V to 600 V
T_A	45 °C	45 °C

Modulation	Sinus-Dreieck-Vergleich	Sinus-Dreieck-Vergleich
Type	Kontinuierlich	Zyklisch

Werden zwei ACS880, die entweder mit EP+ oder XHP2 Modulen ausgestattet sind, im kontinuierlichen Betrieb verglichen, kann der in Abbildung 2 angegebene Ausgangsstrom erreicht werden.

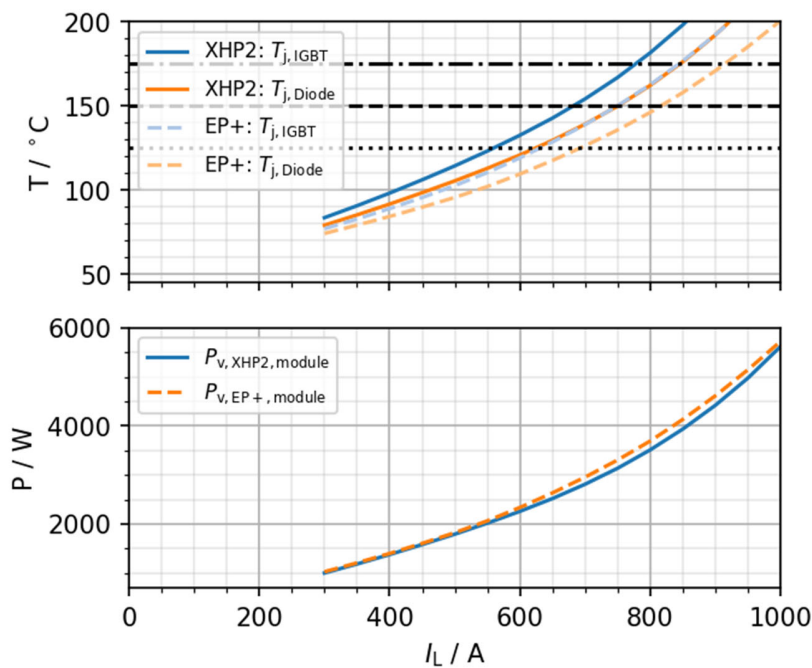


Abbildung 14: Ergebnisse der Systemsimulation des ACS880 für die kontinuierliche Anwendung Lüfter

Aufgrund der erhöhten thermischen Impedanz des XHP2-Moduls erhöht sich die Sperrschichttemperatur bei gleichem Ausgangsstrom im Vergleich zum EP+-Modul. Geht man von einer möglichen Erhöhung der Sperrschichttemperatur um 25 K aus, liefert der ACS880 mit XHP2-Modulen einen etwas höheren Ausgangsstrom, wie in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Die Simulationsergebnisse des möglichen Ausgangsstroms im Dauerbetrieb (Lüfter)

IRMS	125°C	150°C	175 °C	200 °C
XHP2	557 A	680 A	775 A	850 A
	+22 %	+13%	+10%	
EP+	624 A	747 A	847 A	920 A
	+19 %	+13%	+9%	

Power2Power Schlussbericht

Eine Analyse führt zu dem in Abbildung 15 dargestellten Wirkungsgrad des IGBT-Moduls im Umrichter.

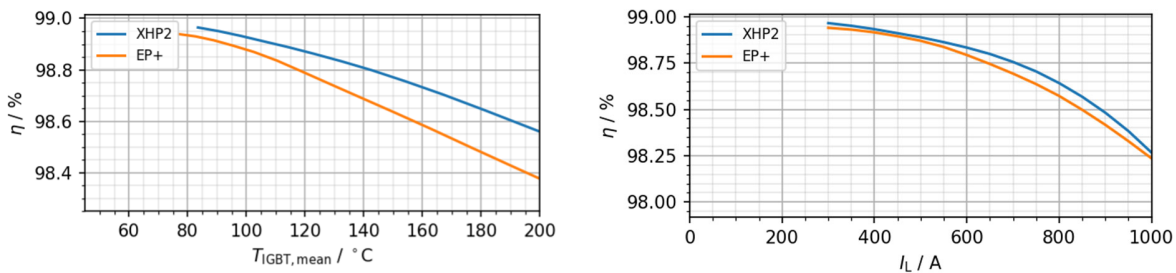


Abbildung 15: Der Wirkungsgrad der beiden IGBT-Module des ACS880 für die Anwendung Lüfter

Der Wirkungsgrad des XHP2-Moduls ist im Vergleich zum EP+-Modul bei gleicher Sperrschichttemperatur aufgrund der geringeren Einschalt- und Schaltverluste höher. Um den gleichen Ausgangsstrom zu erhalten, muss jedoch aufgrund des höheren thermischen Widerstandes des XHP2-Moduls eine höhere Sperrschichttemperatur zugelassen werden. Dies führt zu höheren Verlusten und damit zu einem sinkenden Wirkungsgrad. Bei gleichem Ausgangsstrom sind die Wirkungsgradunterschiede der beiden Module vernachlässigbar ($<0,08\%$). Damit kann das **KPI der Wirkungsgraderhöhung** der Anwendung

- Lüfter von 98.0 % auf 98.5 %
- Zuckerzentrifuge von 97.0 % auf 97.5 %

nicht erfüllt werden.

Ein weiteres KPI ist die Lebensdauer des Antriebes der Zuckerzentrifuge. Der Referenzumrichter hat eine Lebensdauer von fünf Jahren. Diese soll auf zehn Jahre erhöht werden. Zu diesem Zweck wird das Lastprofil der Zuckermühlentrifuge simuliert (siehe Abbildung 16).

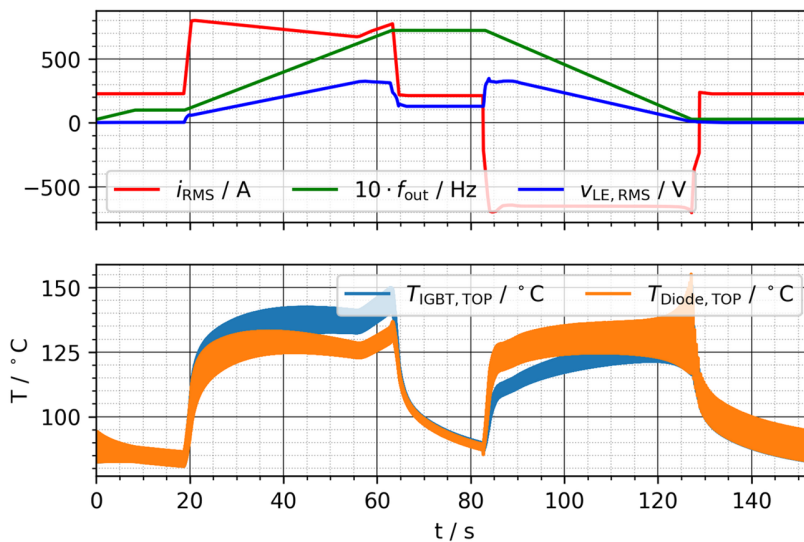


Abbildung 16: Zyklus und resultierende Temperatur der IGBT- und Diodensperrschicht des ACS880 mit XHP2 Modulen

Power2Power Schlussbericht

Das sich daraus ergebende Temperaturprofil wird mit dem Rainflow-Algorithmus und den von IFAG zur Verfügung gestellten Power-Cycling-Diagrammen analysiert, die Lebensdauer kann wie in Abbildung 17 dargestellt, abgeschätzt werden.

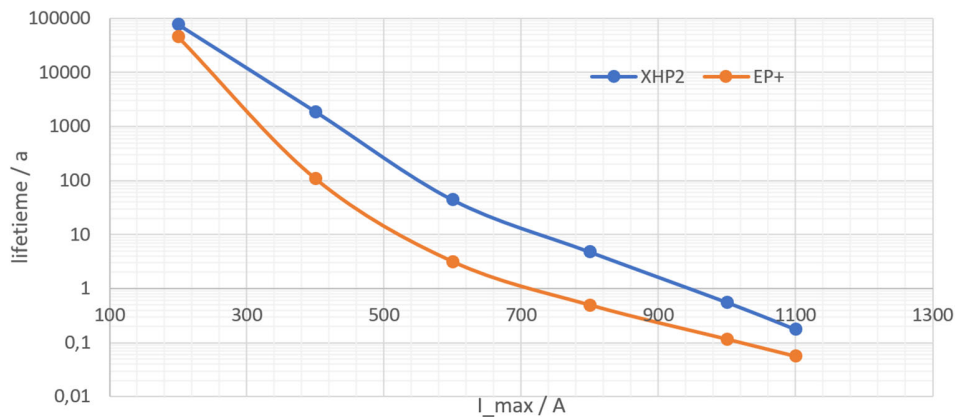


Abbildung 17: Lebensdauer als Funktion des maximalen Ausgangs-RMS-Stromes für den ACS880 mit XHP2 und EP+ Modulen

Im relevanten Zeitraum der Lebensdauer (fünf bis 50 Jahre) ist die Lebensdauer des XHP2-Moduls zehnmal höher als die des mit Econopack+-Modulen ausgestatteten ACS880. Daher wird das **KPI** einer **erhöhten Lebensdauer** simulativ **erfüllt**. Bei der gewünschten Lebensdauer von zehn Jahren ist der mögliche Ausgangsstrom des ACS880 mit

- XHP2-Modulen $I_{\text{XHP2,RMS,max,10a}} = 728 \text{ A}$ ($T_{\text{j,max}} = 138 \text{ °C}$) and
- Econopack+ Modulen is $I_{\text{EP+,RMS,max,10a}} = 524 \text{ A}$ ($T_{\text{j,max}} = 90 \text{ °C}$).

Daher kann der Ausgangsstrom bei gleicher Lebensdauer um 39 % erhöht werden.

Mit diesen Ergebnissen werden die Lebenszykluskosten wie folgt geschätzt:

- Ein R8i-Wechselrichter besteht aus zwei Modulen
- Drei Module passen in einen Schaltschrank
- Es gibt große Schränke und kleine Schränke

Mit den in Tabelle 5 angegebenen Kosten pro Modul und Schrank können die Gesamtkosten für verschiedene Ausgangsströme und eine gewünschte Lebensdauer von 10 Jahren berechnet werden.

Tabelle 5: Übersicht der Kostenabschätzung (Schaltschrank Kosten: klein=0.5, groß=1)

R8i Vielfache n_{R8i}	Modul- kosten	Schaltschrank- kosten	Gesamt- kosten
1	2	1.0	3.0
2	4	1.5	5.5
3	6	2.0	8.0
4	8	2.5	10.5

5	10	3.5	13.5
6	12	4.0	16.0

Die Anzahl der parallelgeschalteten ACS880 (R8i-Vielfache) wird nun nach folgender Regel berechnet, und die daraus resultierenden Kosten sind in Abbildung 18 dargestellt.

$$n_{R8i} = \left\lceil \frac{I_{RMS,max}}{I_{module,RMS,max,10a}} \right\rceil$$

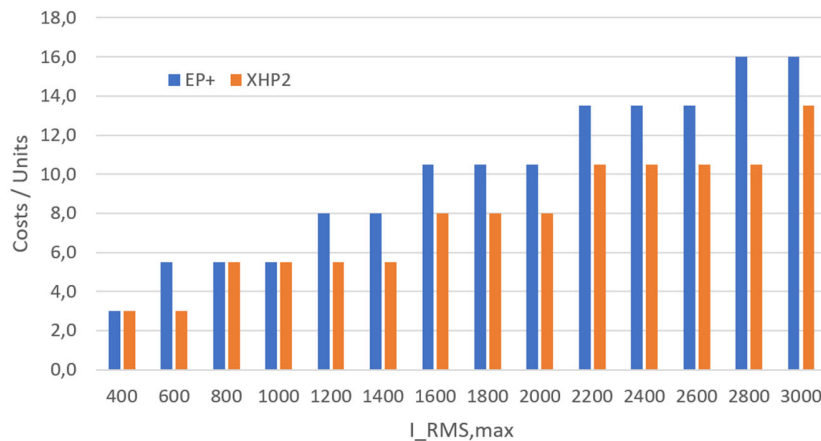


Abbildung 18: Die Kosten des Antriebes für verschiedene maximale RMS-Ströme

Wählt man nun einen kontinuierlichen Ansatz und passt eine lineare Funktion in Abbildung 18 an, so lässt sich die Kosteneinsparung wie folgt berechnen

$$\text{cost saving} = \frac{\text{costs}_{\text{ACS880,EP+}} - \text{costs}_{\text{ACS880,XHP2}}}{\text{costs}_{\text{ACS880,EP+}}} \cdot 100 \%$$

und resultiert in

- $I_{RMS,max} < 800 \text{ A} \rightarrow \text{cost saving} < 15 \%$
- $800 \text{ A} < I_{RMS,max} < 2000 \text{ A} \rightarrow 15 \% < \text{cost saving} < 20 \%$
- $2000 \text{ A} < I_{RMS,max} \rightarrow 20 \% < \text{cost saving}$

Somit wird das **KPI von 20 % reduzierten Lebenszykluskosten** für hochparallele Antriebe mit einem Ausgangsstrom von **mehr als 2000 A erfüllt**.

Das gleiche Verfahren wird auch für die kontinuierliche Anwendung Lüfter angewandt. Hier ist die Kosteneinsparung $I_{RMS,max} < 800 \text{ A} \rightarrow \text{cost saving} < 11 \%$

- $800 \text{ A} < I_{RMS,max} < 2000 \text{ A} \rightarrow 11 \% < \text{cost saving} < 14 \%$
- $2000 \text{ A} < I_{RMS,max} \rightarrow 14 \% < \text{cost saving}$

Daher ist dieses **KPI für die Anwendung Lüfter nicht erfüllt**.

PCB-basierter Wechselrichter

Neben dem Hochleistungswechselrichter ACSS880 von ABB wird auch ein selbst entwickelter Wechselrichter auf dem easy1B-Modul (siehe Abbildung 20) im Dauerbetrieb getestet. Der

Power2Power Schlussbericht

Demonstrator wird an eine RL-Last angeschlossen (siehe Abbildung 19) und die Ausgangsfrequenz wird so eingestellt, dass der gewünschte $\cos(\varphi)$ erreicht wird.

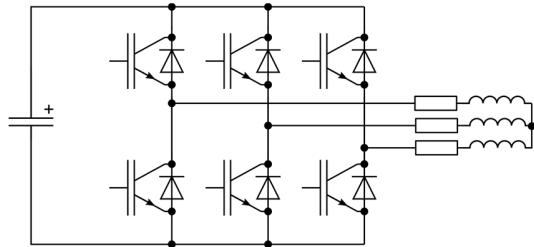


Abbildung 19: Die Topologie des Prüfstandes für den Dauerbetrieb des easy1B-Demonstrators

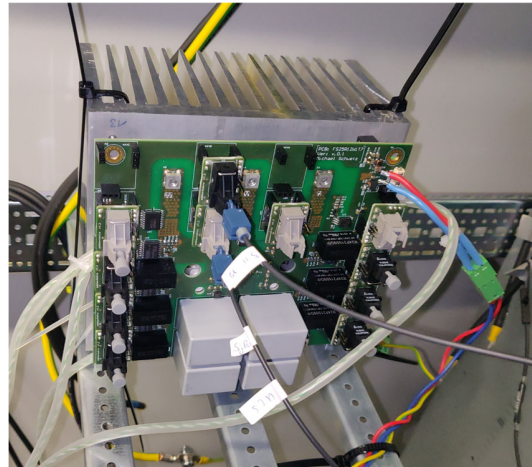


Abbildung 20: Der entworfene Wechselrichter mit dem easy1B-Modul im Teststand

Ziel der Messungen ist es, zu untersuchen, wie sich die Sperrschichttemperatur auf den Ausgangsstrom und die Temperatur der Leiterplatte und der Bauteile auswirkt. Die Messungen wurden mit natürlicher und mit erzwungener Kühlung durchgeführt. In Tabelle 6 ist der durch Simulation und Messung ermittelte mögliche Ausgangsstrom des Prototyps aufgeführt.

Tabelle 6: Die Simulations- und Messergebnisse des möglichen Ausgangsstroms mit dem easy1B-Demonstrator

$T_{j,max}$	Natürliche Konvektion		Erzwungene Konvektion	
	Simulation	Messung	Simulation	Messung
125 °C		7.8 A		19.0 A
		+25.6 %		+16.8 %
150 °C	10.5 A	9.8 A	20.0 A	22.2 A
	+16.1 %	+17.0 %	+ 15.0 %	+10.8 %
175 °C	12.2 A	11.5 A	23.0 A	24.6 A
	+14.8 %	+10 %	+8.7 %	+6.9 %
200 °C	14.0 A	12.6 A	25.0 A	26.3 A

Daraus ergeben sich die folgenden Schlussfolgerungen:

- Die durchgeführte Simulation ist geeignet, die Sperrschichttemperatur mit einer Genauigkeit von 10 % zu bestimmen.

Power2Power Schlussbericht

- Ein Anstieg der Temperatur führt auch zu einem Anstieg der möglichen Ausgangstemperatur, aber
 - Die Verluste nehmen mit steigender Temperatur zu
 - Der Anstieg des möglichen Ausgangsstroms nimmt mit steigender absoluter Temperatur ab
- Zwangskühlung erhöht den Ausgangsstrom um den Faktor 2,1 ... 2,4
- Der Anstieg des Ausgangsstroms ist bei natürlicher Konvektion größer. Mögliche Ursachen:
 - Die Wärmespreizung der natürlichen Konvektion ist im Vergleich zur erzwungenen Kühlung erhöht
 - Eine erhöhte Sperrschichttemperatur erhöht die mittlere Oberflächentemperatur stärker, wenn natürliche Konvektion angewendet wird.

Die Leiterplatten- und Bauteiltemperaturen werden mit einer Infrarot Kamera gemessen. Zwei Aufnahmen bei einer Sperrschichttemperatur von 175 °C sind in Abbildung 21 dargestellt und die resultierenden Temperaturen sind in Tabelle 7 gelistet.

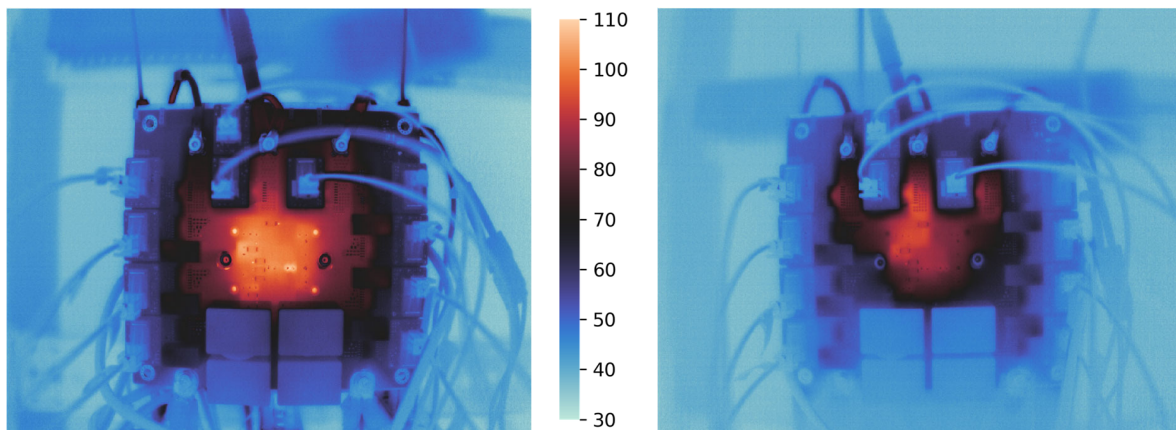


Abbildung 21: Zwei Infrarot Aufnahmen der Bauteile und der Leiterplatten bei einer Sperrschichttemperatur von 175 °C mit natürlicher Konvektion (links) und erzwungener Konvektion (rechts)

Tabelle 7: Eine Liste der Bauteil- und Leiterplattentemperaturen bei natürlicher und erzwungener Konvektion

	Natürliche Konvektion / °C			Erzwungene Konvektion / °C		
IGBT (max)	150,0	175,0	200,0	150,0	175,0	200,0
PCB (max)	93,5	106,7	116,3	75,9	84,9	92,8
Treiber	71,7	75,8	81,5	61,6	64,8	67,1
Stromsensor	69,3	74,9	78,5	66,8	73,4	78,5
DCDC-Converter	70,4	72,6	75,2	58,9	60,5	61,7
DC-Kondensatoren	55,1	57,0	59,6	43,8	46,9	47,9
Kühlkörper	120,8	135,3	147,9	81,0	89,1	96,2

Selbst wenn bei erzwungener Konvektion der doppelte Strom durch die Leiterbahnen (35 µm Kupferdicke) fließt, steigt die Temperatur der Leiterplatte nicht an. Dies ist auf eine geringere Anschluss- und Oberflächentemperatur des Moduls und des Kühlkörpers zurückzuführen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Bauteiltemperaturen in beiden Fällen unter den kritischen Temperaturen liegen. Die Glaspunkttemperatur von FR4 zum Beispiel liegt bei 135 °C. Unter Berücksichtigung einer Temperaturreserve von 10 K wird diese Temperatur auch im ungünstigsten Fall nicht überschritten.

Durch den Einsatz von Zwangskonvektion wird die Kühlkörpertemperatur um 40 K reduziert.

Schlussfolgerung: Die Verwendung einer Sperrschichttemperatur von 200°C ist bei IGBT-Modulen mit geringer Leistung für die Leiterplattenmontage ohne größere Probleme möglich.

Professur für Technische Logistik

Die Technische Universität Dresden, Professur für Technische Logistik konnte wesentliche Ergebnisse erzielen. Diese lassen sich den Tasks 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3, 4.2.1, 4.2.3 und 4.3.2 zuordnen, im Detail:

Task 4.1.1

Die Bearbeitung des Tasks 4.1.1 erfolgte in enger Kooperation mit dem Projektpartner SIL. Dabei wurden in 2019 mehrere Vorortbegehungen der Waferfertigungsanlage und insbesondere der Verpackungslinie durchgeführt. Des Weiteren wurden Workshops durchgeführt. Schwerpunkt bildete jeweils die Analyse des Verpackungsprozesses aus wirtschaftlicher bzw. logistischer Sicht. Es wurden kleinere Verbesserungsvorschläge wie bspw. das Vereinheitlichen des Labelingprozesses über die verschiedenen Kunden hinweg unterbreitet und diskutiert. Darauf aufbauend ergab eine Analyse der Qualität des

Power2Power Schlussbericht

Verpackungsprozesses, dass die Erwartungen an die Druckqualität der selbstklebenden Label in seltenen Fällen nicht die Erwartungen seitens SIL und des Kunden erfüllt. Im ersten Schritt der anschließenden Untersuchungen fand eine Kategorisierung der Fehler statt: bspw. vertikale/horizontale Verschmutzungen, Verschiebungen oder Tintenkleckse.

Darauf aufbauend standen Möglichkeiten der automatischen Fehlererkennung in gedruckten Labels und im Speziellen die Evaluierung der Methoden im Fokus. Es wurden drei grundsätzliche Verfahren durch die TUDD identifiziert:

- Differenzmethode,
- Vergleich der Struktur schwarzer Flächen und
- Bewertung der Lesbarkeit durch Ansätze des maschinellen Lernens.

Deren Funktionsweisen sowie die zu erwartenden Stärken und Schwächen wurden in Präsentationen aufbereitet, sodass sie in Workshops diskutiert werden konnten, mit dem Ziel, der Festlegung einer Vorzugsvariante. Im Ergebnis wurde der Ansatz der Fehlererkennung mittels Verfahren des maschinellen Lernens (ML) favorisiert. In diesem Zuge fand eine umfangreiche Datenbeschaffung und -aufbereitung statt. Konkret stellte SIL sowohl bereits digitalisierte Fehlermuster bereit als auch aussortierte Druckerzeugnisse/Labels aus dem laufenden Betrieb. Zwecks der Digitalisierung zweitgenannter wurde seitens TUDD ein Versuchsaufbau samt geeigneter Kameratechnik entworfen, aufgebaut und angewendet. Parallel erfolgte die Programmierung eines geeigneten Skriptes zur automatisierten Generierung von Trainingsdatensätzen, d. h. absichtlich und zufällig mit Fehlern versehener Labels – Abbildung 22 zeigt dies beispielhaft.

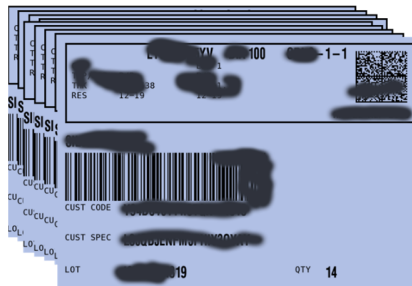


Abbildung 22: Per Skript generierte, absichtlich fehlerhafte Labels

Aus zunächst Vorstudien mit Anwendung der ML-Ansätze wurden das Design of Experiments abgeleitet, um letztlich den verfolgten Ansatz insgesamt, als auch die Güte der ML-Ansätze und deren notwendige Parametrierung als Teilaufgabe zu bestimmen.

Der Versuchsplan zur Beurteilung der Güte von Ansätzen des maschinellen Lernens zur Erkennung fehlerhafter Labels wurde daraufhin ausgeführt sowie verschieden parametrisierte neuronale Netze entworfen und getestet, sodass eine Vorzugsvariante identifiziert und deren praktische Tauglichkeit zusammen mit SIL diskutiert werden konnte. Im Ergebnis zeigte sich, dass eine Zuverlässigkeit von ca. 90 % erreicht werden kann, d. h. weder fehlerhafte Label nicht erkannt oder Label ohne Fehler falsch kategorisiert wurden. Parallel wurde der Versuchsaufbau weiter an die Erfordernisse angepasst, d. h. bspw. vorteilhafte Winkel zur Ausleuchtung oder notwendige Bildauflösungen untersucht und dokumentiert.

Power2Power Schlussbericht

Dem Erreichen der Ziele ging eine Trainingsphase der neuronalen Netze voraus. Hier kam verstärkt das erstellte Skript zur Generierung von Trainingsdaten (fehlerfreie und fehlerbehaftete Label) zum Einsatz. Durch das ausgedehnte und adäquate Training konnte die Erfolgsquote der Fehlererkennung von anfangs 80 % auf die bereits oben erwähnten 90 % gesteigert werden.

Task 4.1.2

In diesem Task hatte die TUDD „nur“ beratende Funktion. Wie geplant hat sie die Arbeiten bzw. ausgearbeiteten Konzepte bezüglich der Handhabung von FOUPs (bzw. FOSBs) im Wareneingang zur Einschleusung in die Produktion mit Expertise begleitet. Dazu wurden Workshops (und teils wöchentlich Meetings) durchgeführt, bei Präsentationen zur Einschätzung/Bewertung zugerarbeitet und Analysen zu Versuchsaufbauten mit erstellt. Im Zentrum stand eine Einschätzung zum Erreichen einer effizienten (Intra-)Logistik.

Task 4.1.3

Die Bearbeitung des Tasks 4.1.3 erfolgte in enger Kooperation mit dem Projektpartnern SIL und IFD statt. Mit beiden Partnern fanden mehrere Workshops statt. Es wurden verschiedene Konzepte der automatischen Roboterkalibrierung erarbeitet, erörtert, bewertet und abgewählt. Im Ergebnis stehen zwei Vorzugsvarianten. Zum einen betrifft dies einen sog. *Mess-FOUP*, welcher bereits Demonstrator-Status hat und auf Vorarbeiten von SIL beruht. Zum zweiten hat die TUDD ein eigenes Konzept, sog. *Mess-Box* entwickelt und vorgestellt. Die beiden Ansätze verfolgen unterschiedliche Konzepte: Während der *Mess-FOUP* manuell zum betreffenden Roboter bzw. Handler transportiert wird, ist die Prämisse der *Mess-Box* eine enge Integration ins automatische Transportsystem, wobei die Box in einen Standardtransportbehälter eingesetzt wird. Hierzu wurden Analysen zur Auswahl möglicher Sensoren durchgeführt und bewertet, inwieweit das Konzept der Box deren Anwendbarkeit eingeschränkt (im Gegensatz zum *Mess-FOUP* mit mehr Freiheitsgraden) und so möglicherweise die Datenqualität beeinflusst wird. Es fand eine Recherche möglicher Sensoren (u. a. zur Ermittlung von Handlertrajektorien und deren Abweichung zur Solltrajektorie bzw. -position) statt und zusätzlich wurde ein Workshop und eine Demonstration mit einem Sensorhersteller für Tiefenbildkameras durchgeführt.

Im Ergebnis, d. h. nach Konsolidierung der Workshops und Nutzenanalysen sind die Schwerpunkte weiterer Untersuchungen festgelegt worden: Vor dem Hintergrund unterschiedlicher Anwendungsszenarien, wurden beide Ansätze weiterverfolgt. Die TUDD konzentrierte sich dabei auf die/ihre sog. *Mess-Box* und finalisierte die in 2019 gestartete Evaluation notwendiger und möglicher Sensoren, welche anschließend entsprechend zur Beschaffung ausgeschrieben, beschafft und in der *Mess-Box* verbaut wurden, sodass diese den Status eines funktionsfähigen Demonstrators erhielt. Das Gehäuse des Demonstrators wurde im 3D-Druckverfahren hergestellt. Parallel fand die Integration und Programmierung des Mikrocontrollers zur Sensordatenfusion statt. Es entstand entsprechender Quellcode und, mit der Absicht der Nachvollziehbarkeit/des Verständnisses Dritter, eine Dokumentation.

Die Funktions- und Anwendungstauglichkeit der Demonstrator-Mess-Box wurde in Feldexperimenten an TUDD-eigenen Versuchsständen sowie in den (Rein-)Räumlichkeiten der Projektpartner evaluiert. Im Detail entstanden neben dem Hauptprogramm auch Routinen

Power2Power Schlussbericht

und Sicherheitsfunktionen, um Beschädigungen und Fehlfunktionen an den Versuchsständen zu vermeiden.

Für den Funktionsnachweis im Feld Versuchsplan erstellt. Dieser beschreibt den Referenzprozess, ausgewählte Maschinen und den Umfang (bspw. Wiederholhäufigkeiten) der Experimente. Die eigentlichen Feldversuche wurden kollaborativ in den Versuchs- und Produktionshallen der Partner durchgeführt. Dabei wurden wie geplant umfangreich Trajektorien der Roboter und/bzw. deren Endeffektoren im Einsatz durch den entwickelten Demonstrator erfasst. Es erfolgte eine statistische Auswertung der gesammelten Daten und Ergebnis die Erkenntnis, dass die gesetzten Ziele, d. h. unter anderem die genaue, präzise und robuste Bestimmung der Koordinaten von Substraten zur Rekalibrierung der Automatisierungstechnik, erreicht werden können. Abbildung 23 zeigt CAD-Skizzen und die entstandene Demonstrator-Mess-Box samt Datenmodell.

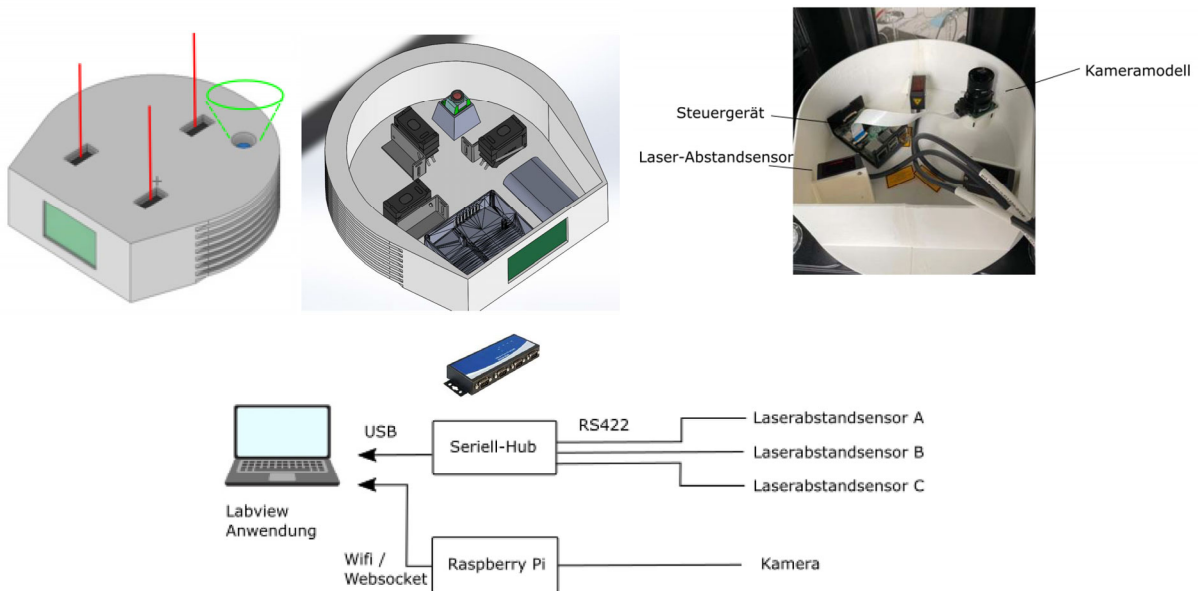


Abbildung 23: CAD-Skizzen/Baugruppen, 3D-Druck sowie das Datenmodell der Demonstrator-Mess-Box

Task 4.2.1 und Task 4.2.3

Während der Bearbeitung hat sich eine sehr enge Verzahnung der Inhalte und Ergebnisse der Tasks 4.2.1 und 4.2.3 herausgestellt, weshalb auf eine Separierung im vorliegenden Bericht verzichtet wird. Die Arbeiten wurden in enger Kooperation mit der IFAG und der Back-End-Fabrik in Warstein durchgeführt. Vor dem Hintergrund einer besseren Integration und Adaption von Fron-End-Prozessen, fanden Vorortbegehungen in Warstein und Videoanalysen des Wareneingangs und der Weiterverarbeitung statt – Abbildung 24 vermittelt einen Eindruck der Arbeiten.

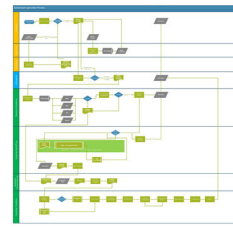
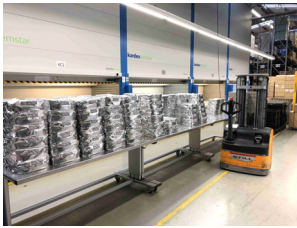


Abbildung 24: Vorortbegehungen bei Partnern; Aufbereitung der Analysen

Die Erfassung des IST-Zustandes diente als Input zur Herausarbeitung logistisch ineffizienter Prozesse. Im Ergebnis zeigte sich:

- Das Umlaufregal Kardex bietet keine übergeordnete Belegungsinformation, sodass aufwendig, manuell nach freien Lagerplätzen gesucht werden muss. Nach dem Einlagern wird der Lagerplatz des Tablars zwar erfasst, die Information aber nicht bereitgestellt/aufgearbeitet.
- Beim Einlagern von Wafer-Ladungsträgern weist der Prozess der Erfassung mehrere Medienbrüche auf.
- Eingehende Lose werden in jedem Fall eingelagert, selbst wenn eine direkte Weiterverarbeitung möglich wäre. Es fehlt zugehöriger Informationsprozess.
- Der Magazinierungsprozess/die Losfreigabe erfolgt zyklisch und nicht permanent. Dies führt zu stark schwankenden Arbeitslasten der Mitarbeiter in der Magazinierung und entsprechend zu sog. Work-In-Progress-Wellen in nachgelagerten Prozessschritten.
- Der Transport zwischen Wareneingang und Arbeitsvorbereitung muss manuell mittels LKW oder in dringenden Fällen gar durch einen Mitarbeiter erfolgen, weil eine örtliche Trennung vorliegt.

Die aufgezeigten Mängel dienten der Konzipierung von Lösungsvorschlägen zur Eliminierung bzw. Minderung. Es wurden in zahlreichen Workshops Machbarkeitsstudien entwickelt und Kosten-Nutzen-Analysen durchgeführt. Als Zwischenergebnis wurde das Spektrum an Vorschlägen erweitert. Letztlich sind folgende Konzeptideen und Anregungen seitens TUDD erstellt worden:

- Zeitkritische Lose sind bereits bei der Einlagerung zu identifizieren.
- In der Arbeitsvorbereitung sollte eine nicht zyklische, sondern permanente Auslösung der Magazinierung möglich sein.
- Der Gebrauch von Lageretiketten ist in Frage zu stellen bzw. ein Verzicht sinnvoll.
- Erweiterung der IT-Infrastruktur, um Daten der Fertigungslose schneller, umfangreicher und überhaupt zwischen den Arbeitsbereichen auszutauschen.
- Der sinnvolle Einsatz von Tracking- und Tracing-Technologien ist zu prüfen.

Bzgl. letztgenanntem Punkt der Aufzählung erfolgte eine Technologie- und Marktrecherche von der TUDD. Die Ergebnisse wurden präsentiert und zusammen mit IFWAR ausgewertet.

Power2Power Schlussbericht

Parallel sind Ineffizienzen im Zusammenhang des Leerbehältermanagements in der Supply-Chain der Back-End-Fertigung aufgedeckt und systematisiert worden. Hier stellte sich heraus, dass eine Neuausrichtung vergleichsweise

- hohe Effizienzsteigerungen der Intralogistik (bspw. bzgl. Durchlaufzeiten, Liefertreue) verspricht,
- geringe Investitionen im Falle einer Reorganisation bedarf und
- eine hohe Dringlichkeit und damit auch Akzeptanz bei den Beteiligten erfährt.

Die TUDD hat mögliche Konzepte recherchiert und konkrete Möglichkeiten der Adaption aufgezeigt. Diese standen bei IFWAR zur Erörterung und zum Projektende in der Diskussion zur teilweisen Umsetzung.

Task 4.3.2

In diesem Task leistete die TUDD Zuarbeit für die Arbeiten von IFAG. Inhalt war der Einsatz von Ontologien zur Optimierung von Supply-Chains und -Networks, sowohl interner als auch externer. Die Zuarbeit erfolgte in Form von Literaturrecherchen, d. h. dem Sammeln, Selektieren und Auswerten potentiell relevanter Veröffentlichungen. Es wurden relevante Paper, deren Inhalt über den aktuellen Wissen- und Entwicklungsstand hinausgehen, identifiziert und in Form von Literaturdatenbanken gespeichert. Dem Voraus gingen Workshops mit IFAG mit Inhalt der detaillierten Problembeschreibung und den Zielsetzungen.

Das Literaturportfolio diente als Basis gemeinsamer Workshops zur Bewertung und Auswertung der Inhalte bzw. deren Relevanz. In mehreren Sitzungen wurde sich besprochen und der Fortschritt der Literaturanalyse vor dem Hintergrund der Anwendungspotentiale bzgl. der Ziele in Power2Power besprochen und Schwerpunkte gesetzt. Im Ergebnis entstand u. a. gemeinsam mit den Projektpartner IFAG ein Video, was die Hintergründe und Nutzen von Ontologien beschreibt.

Notwendigkeit der geleisteten Arbeit

Durch die im Projekt geförderten Arbeiten konnten die beschriebenen Ergebnisse und damit die Ziele der TU Dresden im Speziellen und vor dem Hintergrund des Gesamtvorhabens erreicht werden. Dies ermöglicht nun eine wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse durch die deutschen Partner.

Insbesondere konnten hier neue Technologien im Bereich wettbewerbsfähiger IGBT und effiziente Konzepte zur Fertigung sowie für Transport- und Handhabungsprozesse erarbeitet werden. Diese sind von besonderem wirtschaftlichen Interesse für Deutschland, da sie es deutschen Unternehmen nach Abschluss des Projekts ermöglichen, innovative (Leistungs-)Halbleiter als Basis bspw. für Sensorsysteme für den Weltmarkt zu fertigen. Dazu wurden neue Technologien erforscht, entwickelt und erprobt, um so Schlüsseltechnologien für zukunftsweisende Märkte bereitzustellen.

Voraussichtlicher Nutzen

Der Verwertungsplan hat sich im Vergleich zum Antrag nicht maßgeblich verändert. Durch die Förderung konnten die Partner Technologien und Kompetenzen entwickeln als Grundlage für

Power2Power Schlussbericht

die nächste Generation der Mobilität, Industrie und Stromnetze einer CO₂-freien Ära. Die Halbleiterfertigung in Europa und in besonderem Maße in Deutschland profitieren wesentlich und nachhaltig von den Power2Power-Projektergebnissen – die gesamte Wertschöpfungskette für die adressierten Themen in Deutschland wird gestärkt.

Der Fokus von Power2Power lag auf dem Gebiet der Elektroniksysteme bzw. speziell für das deutsche Teilprojekt und der beiden beteiligten Professuren *Technische Logistik* sowie *Leistungselektronik* auf der Erforschung deren Komponenten und ihrer effizienten Produktion.

Die Ergebnisse der TU Dresden sind insgesamt der experimentellen Entwicklung, d. h. technologischen Reifegraden von ca. 5 – 7 zuzuordnen. Gleichwohl gab es Anteile, die der (Grundlagen-)Forschung zuzuordnen sind. Die Konzeption, Erstellung und Tests von Demonstratoren konnte mit Partnern realisiert werden. Die Zusammenstellung der Partner (Forschung, KMU und Großindustrie) erwies sich in ihrer Art und Weise als sehr positiv. Die Ergebnisse/Erkenntnisse lassen wenig Zweifel am Nutzen, d. h. einer zeitnahen Verwertung und aussichtsreichen Überführung in konkrete Lösungen.

Damit liefert das Forschungsprojekt relevante Beiträge zur Hightech-Strategie der Bundesrepublik Deutschland und zum Förderprogramm IKT 2020 des BMBF. Von den prioritären Zukunftsaufgaben generieren die deutschen Partner von Power2Power bzw. die TU Dresden vor allem Nutzen für „Elektroniksysteme für die Elektromobilität“ sowie „Nachhaltige und effiziente Energieversorgung“.

Es ist zu erwarten, dass die Ergebnisverwertung in einem bedeutenden Umfang in Deutschland erfolgen und somit einen nachhaltigen wirtschaftlichen Nutzen für Deutschland und Europa im Sinne von Beschäftigungssicherung und -ausbau, Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit sowie verbesserte Wertschöpfung erbringen wird.

Die Zusammensetzung der deutschen Partner im Konsortium stellt sicher, dass die zukünftige Verwertung der Ergebnisse in Deutschland auf einer breiten Basis erfolgen wird. Dies wird nicht zuletzt durch die Beteiligung der TU Dresden als international anerkannte Hochschule gewährleistet. Damit ist auch sichergestellt, dass die gewonnenen Erkenntnisse für die weitere Ausbildung wissenschaftlichen und technischen Nachwuchses eingesetzt sowie als Ausgangspunkt neuer Forschung und Entwicklung dienen.

Fortschritt bei anderen Stellen

Keine bekannt.

Veröffentlichungen

Eine vollständige Liste der Veröffentlichungen des Konsortiums kann unter <https://cordis.europa.eu/project/id/826417/results> eingesehen. Dort werden Einträge werden im EU Funding and Tenders Portal unter der Project ID 826417 geführt. Seitens Technische Universität Dresden ist Open Access verfügbar:

P. Boden, S. Rank, T. Schmidt: Scheduling by High-Performance Computing - An example for AGV considering transport carrier transfers. 1. Virtual European Advanced Process Control and Manufacturing Conference. 2021.

Power2Power Schlussbericht

P. Boden, S. Rank, T. Schmidt: Modified Adaptive Large Neighborhood Search for Scheduling Automated Guided Vehicle fleets considering dynamic transport carrier transfers. 2020 Logistics Journal. 2020.

M. Schütz: Temperaturanalyse von PCB basierten leistungselektronischen Modulen mit einer erhöhten IGBT Sperrschichttemperatur. Eigenverlag Technische Universität Dresden, Master's Thesis. 2021.

F. Lindner, G. Schneider, F. Sollinger, G. Schwalb, S. Rank, K. A. Przybysz, S. Keil: Automation and Digitalization along the Supply Chain for Power Semiconductors from Wafer Supplier to Backend Manufacturer. 21st European advanced process control and manufacturing (apc|m) Conference. 2023

Des Weiteren war die TU Dresden an der Erstellung zweier Videos beteiligt. Diese zeigen

- ein programmiertes Simulationsmodell des automatischen Transport- und Handhabungssystems im Kontext der Analyse einer effizienten Intralogistik in Back-End-Bereich sowie
- ein Einsatzszenario bzw. Tests des Demonstrators zur Erfassung von Trajektorien von Roboter-Endeffektoren.

Die Videos sind von der Power2Power-Projekt-Website abrufbar. Der Link lautet:

<http://power2power.eu/>.

Quellen

[1] SINAMICS - Low Voltage Projektierungshandbuch. 6.5 ed. Siemens AG, Postfach 47 43, 90025 Nürnberg, Deutschland: 2017.

[2] Dirk Rudolph - D5.10 Commutation cell demonstrator in extended operation range". TU Dresden, 01.09.2019.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN –	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Silizium-Leistungselektronik der nächsten Generation für Mobilität, Industrie und Stromnetze der CO2-freien Ära – Power2Power – Prozessgestaltung und Technologieentwicklung für die zukunftssichere Leistungshalbleiterfertigung sowie -anwendung	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Sebastian Rank, Dirk Rudolph, Thorsten Schmidt, Steffen Bernet	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2022 6. Veröffentlichungsdatum – 7. Form der Publikation Deutscher Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Deutschland: Technische Universität Dresden Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden Professur für Technische Logistik Professur Leistungselektronik	9. Ber. Nr. Durchführende Institution – 10. Förderkennzeichen 16ESE0397S 11. Seitenzahl 33
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn Sächsisches Ministerium für Wirtschaft und Arbeit (SMWA) 01097 Dresden	13. Literaturangaben 2 14. Tabellen 7 15. Abbildungen 24
16. Zusätzliche Angabe –	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) VDI VDE IT, Dresden, den 21.02.2023	
18. Kurzfassung Im Rahmen des ENIAC-Vorhabens Power2Power beteiligte sich die TU Dresden mit der Professur für Technische Logistik sowie mit der Professur für Leistungselektronik. Aufgrund des weltweit steigenden Energiebedarfs, ist eine zunehmende Nutzung erneuerbarer Energien erforderlich, um Kohlendioxidemissionen zu verringern. Für die Energieumwandlung werden effiziente Leistungshalbleiter benötigt, weshalb die Märkte für IGBTs und Module jährlich um rund 15 % wachsen. Um an dieser Entwicklung zu partizipieren, war und ist eine technologische Führerschaft bei der Entwicklung als auch Fertigungskompetenz im globalen Wettbewerb notwendig. Hierzu mussten F&E-Tätigkeiten initiiert und schwerpunktmäßig basierend und über den Stand der Technik hinaus auf 300mm-Siliziumwafern Spannungen >1700 Volt bewältigt, höhere Leistungsdichten erreicht sowie Zuverlässigkeit und Energieeffizienz verbessert werden. Zudem sind effiziente Ansätze zur Fertigung sowie für Transport- und Handhabungsprozesse zu etablieren. Vor dem Hintergrund der formulierten Aufgabenstellungen/Zielen, konnten seitens TU Dresden folgende, wesentliche Ergebnisse erzielt werden: * Maßnahmenkatalog zur Steigerung der Effizienz von Produktion und Logistik * Demonstrator zur Erfassung von Trajektorien von Handhabungstechnik * mittels Literatur-Review: Weiterentwicklung von Semantic-Web-Ansätzen zur Beherrschung komplexer Supply-Chains * Vermessung neuartiger IGBT-Module mittels eines aufgebauten Demonstrators zur Charakterisierung von leistungselektronischen Bauelementen mit einer erhöhten Sperrschichttemperatur!!! * Erkenntnisgewinn auf dem Gebiet der thermischen Charakterisierung durch den Aufbau eines Teststandes zur Charakterisierung von leistungselektronischen Bauelementen inklusive dessen Kühlung * Beurteilung der Anwendbarkeit von Modulen mit einer erhöhten Sperrschichttemperatur von Hochleistungswechselrichter und Wechselrichter kleiner Leistung (PCB-basiert).	

19. Schlagwörter Automatisierung, Digitalisierung, Halbleiter, Leistungshalbleiter, Nachhaltigkeit	
20. Verlag —	21. Preis —

Jendt, 20.3.2023

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN –	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report	
3. title Silizium-Leistungselektronik der nächsten Generation für Mobilität, Industrie und Stromnetze der CO2-freien Ära – Power2Power – Prozessgestaltung und Technologieentwicklung für die zukunftssichere Leistungshalbleiterfertigung sowie -anwendung		
4. author(s) (family name, first name(s)) Sebastian Rank, Dirk Rudolph, Thorsten Schmidt, Steffen Bernet	5. end of project 30.09.2022	
	6. publication date –	
	7. form of publication German Final Project Report	
8. performing organization(s) (name, address) Technische Universität Dresden Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden Professur für Technische Logistik Professur Leistungselektronik	9. originator's report no. –	
	10. reference no. 16ESE0397S	
	11. no. of pages 33	
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn Sächsisches Ministerium für Wirtschaft und Arbeit (SMWA) 01097 Dresden	13. no. of references 2	
	14. no. of tables 7	
	15. no. of figures 24	
16. supplementary notes –		
17. presented at (title, place, date) VDI VDE IT, Dresden, 21.02.2023		
18. abstract Within the ENIAC project Power2Power, Technische Universität Dresden participated with the Chair of Material Handling and the Chair of Power Electronics. Due to the globally rising energy demand, an increasing use of renewable energies is necessary to reduce carbon dioxide emissions. Efficient power semiconductors are needed for energy conversion, which is why the markets for IGBTs and modules are growing by around 15% annually. In order to participate in this development, technological leadership in development as well as in manufacturing competence against the background of global competition was and is necessary. So, R&D activities had to be initiated and focused on 300mm silicon wafers with voltages >1700 volts, higher power densities and improved reliability and energy efficiency. Furthermore, efficient production and logistics are to be established. Against the background of the formulated tasks/objectives, the Technische Universität Dresden was able to achieve the following essential results: * Handbook to increase the efficiency of production and logistics. * Demonstrator to get trajectories of handling equipment * based on a literature review: Further development of semantic web approaches to handle complex supply chains. * Measurement of new IGBT modules by means of a demonstrator for the characterisation of power electronic devices with an increased junction temperature. * Gain of knowledge in the field of thermal characterisation through the construction and utilization of a testbench for characterisation of power electronic devices including its cooling. * Assessment of the applicability of modules with an increased junction temperature of high-power inverters and low-power inverters (PCB-based).		
19. keywords Automation, digitalization, semiconductor, power electronics, sustainability		

20. publisher

21. price

Ende, 20.3.2013